

## Изменения уровня Мирового океана в текущем столетии

В. Н. Малинин, С. М. Гордеева, О. И. Шевчук

*Российский государственный гидрометеорологический университет  
Санкт-Петербург, 192007, Россия  
E-mail: malinin@rshu.ru*

Статья посвящена изученности изменений уровня Мирового океана (УМО) в прошлом и настоящем, анализу генезиса его межгодовых колебаний, а также проекциям УМО на длительную (столетие) перспективу. Рассмотрены два подхода к генезису УМО. В зарубежных исследованиях используется уравнение баланса вод в гидросфере, согласно которому изменения УМО определяются соответствующими изменениями массы воды различных компонент криосферы и запасов поверхностных и подземных вод суши. Другой подход состоит в том, что оценка вкладов различных факторов осуществляется с использованием уравнения пресноводного баланса Мирового океана как сумма эвстатических и стерического факторов. Рассматриваются проекции УМО на конец столетия на основе климатических сценариев по проекту CMIP5. В связи с возможным резким потеплением климата обсуждаются вероятности экстремальных сценариев роста УМО до 2,5 м.

**Ключевые слова:** уровень Мирового океана, спутниковая альтиметрия, GRACE, тренды, глобальное потепление, уровнеобразующие факторы

Одобрена к печати: 15.08.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-9-22

### Введение

Глобальное потепление климата и повышение уровня Мирового океана (УМО) делает неизбежным затопление равнинных прибрежных территорий многих стран, грозит катастрофическим ущербом для инфраструктуры побережья океанов и морей, усиливает штормовые нагоны и наводнения в устьях рек. Все крупнейшие мегаполисы США, Европы, Азии построены на океанском (морском) побережье и потенциально попадают в зону затопления и подтопления. К сожалению, в зоне подтопления окажется и Санкт-Петербург. Уже в 30-е гг. текущего столетия в этой зоне может оказаться от 700 млн до 1 млрд человек. Больше всех пострадают Вьетнам, Таиланд, Бангладеш, Южная Индия, южные острова Японии и прибрежная часть Китая. С вероятностью до 90 % эти территории будут к середине столетия по большей части затоплены или подтоплены. При этом потребуются переселение многих десятков, если не сотен, миллионов человек. В зоне возможных наводнений могут оказаться дополнительно от 20 до 300 млн человек ежегодно (Малинина, 2010).

В связи с этим во многих странах, особенно в США, на исследование данной проблемы тратятся огромные финансовые ресурсы. В России исследования морского уровня выполняются преимущественно в региональном масштабе. Правда, во второй половине нулевых годов текущего столетия в Российском государственном гидрометеорологическом университете (РГГМУ) начались работы по изучению закономерностей межгодовых колебаний УМО, выявлению их генезиса, оценке вклада различных уровнеобразующих факторов в формирование тренда УМО, построению комплекса физико-статистических моделей долгосрочного прогноза УМО с различной заблаговременностью. Результатом их стал цикл публикаций в периодической печати (Малинин, 2010, 2015; Малинин, Шевчук, 2008; Малинин, Глок, 2014; Малинин и др., 2007; Malinin, 2009 и др.) и издание единственной в России монографии (Малинин, 2012), причём многие научные результаты были получены впервые. Отметим, что УМО входит в число важнейших параметров климатической системы. Целью данной работы является анализ современного состояния проблемы, а также новые результаты изменчивости

и долговременного прогноза УМО по спутниковым данным и оценки вклада эвстатических факторов в формирование тренда УМО.

### Изменения уровня Мирового океана в настоящем

В общем случае оценки морского уровня можно разделить на три вида: палеоклиматические реконструкции, береговые (футшточные) и спутниковые (альтиметрические) наблюдения. Относительно регулярные береговые наблюдения за уровнем стали проводиться в XIX в. Спутниковые измерения морского уровня начались ещё в середине 70-х гг. XX в., однако достоверными оценки УМО по альтиметрическим данным считаются с ноября 1992 г. после запуска спутника TOPEX/Poseidon.

Первый этап изучения колебаний УМО — это палеоклиматические реконструкции. Однако чем дальше вглубь веков они отступают, тем меньше их надёжность. Поэтому имеет смысл рассматривать изменчивость УМО с последнего Вюрмского оледенения, которое достигло максимального развития около 20 тыс. лет назад. Затем оно стало быстро разрушаться, отступая к очагам своего формирования. По данным проекта Global Warming Art project ([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Post-Glacial\\_Sea\\_Level.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Post-Glacial_Sea_Level.png)), наиболее интенсивный рост УМО начался 15 тыс. лет назад до нашей эры. Средняя скорость роста УМО за последние 18 тыс. лет составила 6,67 мм/год. Поэтому ускорение роста УМО в начале XXI в. до 3,1 мм/год вряд ли является неординарным событием. Скорее — рядовым.

Второй этап изучения колебаний УМО — это береговые наблюдения. Самый длинный ряд стационарных измерений морского уровня имеется по Амстердаму (с 1765 г.), чуть меньше длительность наблюдений в Бресте, Стокгольме и др. В десятку старейших водомерных постов входит и Кронштадт, наблюдения на котором начались с середины XVIII в., а непрерывный ряд морского уровня имеется с 1836 г. При определении УМО по береговым данным возникает целый ряд неопределённостей. К ним относятся: пространственная неоднородность в распределении прибрежных станций с длительными наблюдениями, невозможность измерения морского уровня вне береговой черты, трудности учёта вертикальных движений земной коры и т. п. Тем не менее разными авторами построено значительное число длительных временных рядов УМО. В России единственный ряд межгодовых колебаний УМО был реконструирован в РГГМУ с 1861 по 2005 г. (рис. 1), т. е. за 145 лет (Малинин и др., 2007).

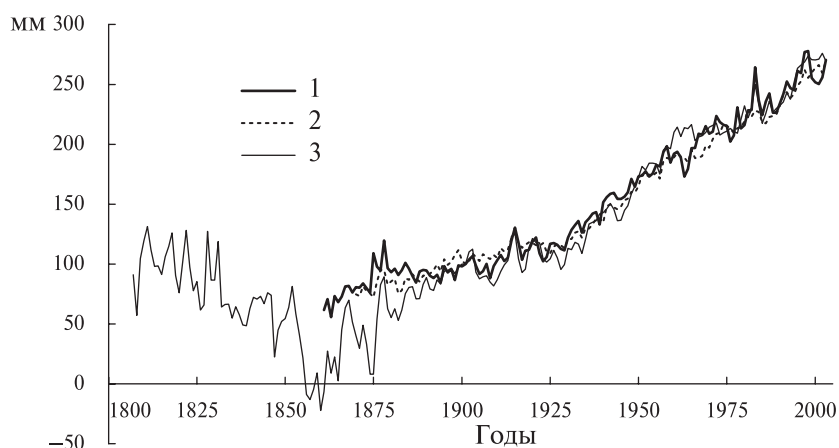


Рис. 1. Межгодовой ход УМО, рассчитанного разными авторами: 1 — модель РГГМУ (Малинин и др., 2007); 2 — данные (Church, White, 2006); 3 — данные (Jevrejeva et al., 2006)

На рис. 1 видно, что средняя скорость роста уровня Мирового океана за рассматриваемый период составляет около 1,4 мм/год, причём тренд описывает 94 % дисперсии исходного ряда. Наличие мощного линейного тренда является главной закономерностью межго-

довых колебаний УМО. В течение XX столетия величина тренда достигала почти 1,8 мм/год. Подробное описание колебаний УМО по береговым данным даётся в работе (Малинин, 2012). Статистическая модель колебаний УМО РГГМУ полностью совместима с реконструкциями УМО других авторов (Church, White, 2006; Jevrejeva et al., 2006), полученными в том числе с использованием более 1000 станций глобального архива футшточных наблюдений архива PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level). Определённые преимущества этой модели перед западными аналогами заключаются в том, что, не уступая им в точности, для расчёта УМО она требует минимум исходной информации, а именно данные только нескольких стационарных береговых станций.

В отличие от береговых данных метод спутниковой альтиметрии позволяет получить оценки уровенной поверхности океана практически для всей его акватории. Достаточно подробный спутниковый мониторинг изменений уровня Мирового океана проводится в Центре по хранению, верификации и интерпретации спутниковых океанографических данных во Франции (AVISO — Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data). Аналогичный мониторинг УМО выполняется также в университете Колорадо, США. В настоящее время доступны альтиметрические оценки морского уровня начиная с ноября 1992 г. При этом центром AVISO предоставляются пользователям альтиметрические данные со спутников Geosat, ERS-1/2, Topex/Poseidon, GFO, Envisat, Jason-1/2/3, Spot, Sentinel-3A, Saral, HY-2, Cryosat. Исходные альтиметрические данные покрывают океан от 66° с. ш. до 66° ю. ш., имеют пространственное разрешение 1/3° в меркаторской проекции, дискретность — 9,9 сут и точность расчёта — 4,2 см (Лебедев, 2008). Неопределённости оценок морского уровня обусловлены методическими аспектами преобразования необработанных спутниковых измерений в реальные оценки морского уровня, необходимостью учёта атмосферных условий, ветровых волн и приливов, а также гляциоизостатического приспособления, в результате чего происходит некоторое увеличение площади океанских бассейнов из-за отступления суши в конце последнего ледникового периода. Приблизённо скорость их увеличения оценивается в  $-0,3$  мм/год с ошибкой не менее 50 % (Carru, 2018).

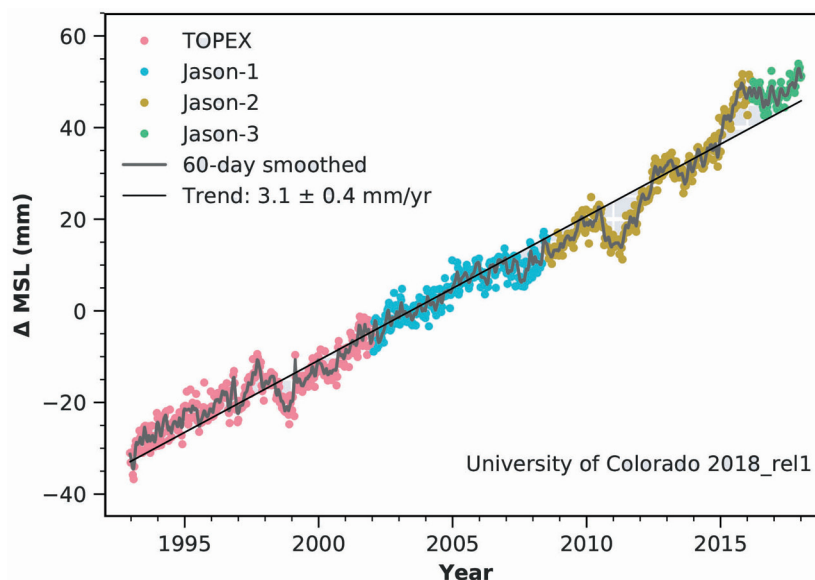


Рис. 2. Межгодовой ход аномалий уровня Мирового океана за 1993–2018 гг. (<http://sealevel.colorado.edu>)

С увеличением пространственного осреднения точность оценок морского уровня существенно возрастает. На рис. 2 представлен межгодовой ход аномалий уровня Мирового океана за 1993–2018 гг. по данным Колорадского университета. Нетрудно видеть, что в колебаниях УМО сохраняется ярко выраженный линейный тренд, равный 3,1 мм/год, который

за последние 10 лет практически не менялся. Случайная ошибка тренда УМО составляет  $\pm 0,4$  мм/год, а коэффициент детерминации тренда описывает почти 95 % дисперсии исходного ряда. Оставшиеся 5 % приходятся на случайные колебания. Максимальное отклонение УМО от тренда отмечалось в 2011 г., когда он был на 10 мм ниже, и в 2016 г., когда он, наоборот, был на 10 мм выше. Годовой ход УМО отсутствует. До 1990 г. величина тренда не превышала 1,5 мм/год. Следовательно, в начале XXI в. произошло двукратное ускорение роста УМО, основными виновниками которого стали океаны южного полушария в результате ускоренного роста теплосодержания их вод (Dangendorf et al., 2016).

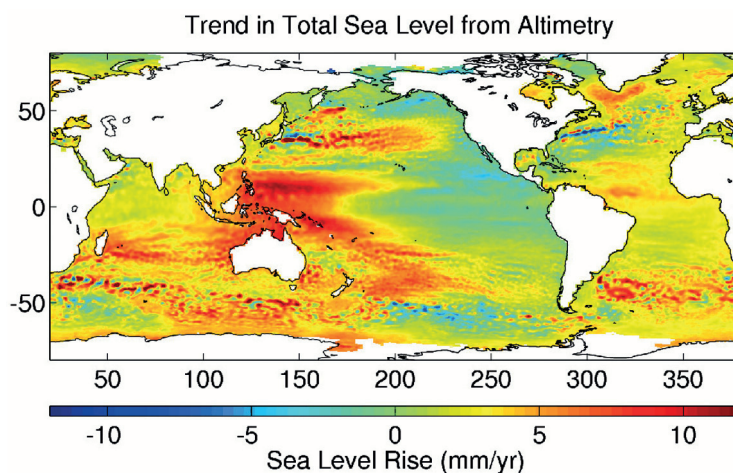


Рис. 3. Пространственное распределение значений линейного тренда морского уровня по акватории Мирового океана за период 1993–2014 гг. по альтиметрическим данным (Ablain et al., 2017)

Естественно, рост морского уровня не может быть одинаковым на всей акватории океана. Как видно из пространственного распределения оценок линейного тренда морского уровня (рис. 3), наиболее ярко его рост был выражен в Тихом океане. Максимальные оценки тренда (до 10 мм/год) отмечались в узкой широтной зоне, примыкающей к Японии, до  $160^\circ$  з.д., и обусловлены в основном деятельностью течения Куросио. Другой очаг максимальных оценок тренда (8–10 мм/год) приурочен к широтной зоне  $10^\circ$  с.ш. от побережья Филиппин до  $160^\circ$  в.д. В тоже время на акватории Тихого океана есть несколько очагов с отрицательным трендом. Это приантарктическая часть океана между  $160$  и  $120^\circ$  з.д., зона Алеутской депрессии и район, примыкающий к южной части западного побережья США и Мексики. В Индийском океане наиболее значительные тренды отмечаются в широтной зоне между о. Мадагаскар и побережьем Австралии и вдоль северной периферии Антарктического циркумполярного течения. В Атлантическом океане выделяются два очага значительных трендов: приантарктическая часть океана и дельта Гольфстрима. Кроме того, на южной границе Гольфстрима отмечается интенсивное опускание уровня.

### Генезис межгодовых колебаний уровня Мирового океана

Без понимания причин и механизмов, вызывающих прошлые и современные изменения УМО, невозможно достоверно осуществлять его долговременные прогнозы. Изучение генезиса межгодовых колебаний УМО возможно на основе двух основных подходов. Исходя из уравнения баланса вод в гидросфере, представляющей собой систему взаимодействующих резервуаров, состоящих из океана, атмосферы, криосферы и вод суши, изменения УМО можно представить в виде (Малинин, 2012):

$$\Delta h_{\text{МО}} = A_{\text{МО}}^{-1}(-\Delta V_{\text{К}} - \Delta V_{\text{Л}} + \Delta V_{\text{стер}}), \quad (1)$$

где  $\Delta h_{\text{МО}}$  — внутригодовые изменения УМО;  $A_{\text{МО}}$  — площадь Мирового океана (МО);  $\Delta V_{\text{к}}$  — изменения массы воды криосферы;  $\Delta V_{\text{л}}$  — изменения запасов поверхностных и подземных вод суши;  $\Delta V_{\text{стер}}$  — стерическая компонента УМО. Изменениями влаги в атмосфере пренебрегается в виду их малости. Именно данное уравнение используется в зарубежных исследованиях по оценке вкладов разных факторов в изменения УМО. Обобщение полученных результатов приводится в Оценочных отчётах межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) и представлены в многочисленных публикациях (AR4 Climate..., 2007; AR5 Climate..., 2013; Curry, 2018; Leuliette, Nerem, 2016; Nerem et al., 2018; WCRP, 2018 и др.).

Другой подход, развиваемый в РГГМУ, состоит в том, что оценка вкладов различных факторов осуществляется с использованием уравнения пресноводного баланса Мирового океана как сумма эвстатических и стерического факторов. Исходя из этого, имеем:

$$\Delta h_{\text{МО}} = A_{\text{МО}}^{-1} (P_{\text{МО}} + M + I - E_{\text{МО}} + \Delta V_{\text{стер}}), \quad (2)$$

где  $P_{\text{МО}}$  — осадки, выпадающие на акваторию МО;  $M$  — материковый (поверхностный и подземный) сток в МО;  $I$  — ледниковый сток в МО;  $E_{\text{МО}}$  — испарение с акватории МО.

В основе этих подходов лежит метод трендов, т.е. выполнение расчётов за различные промежутки времени линейных трендов уровнеобразующих факторов и последующее сравнение их суммы с фактическим трендом УМО. Понятно, что метод трендов адекватен лишь для монотонных рядов и позволяет только приближённо судить о вкладе отдельных факторов, поскольку сильно зависит от величины тренда и вклада коэффициента детерминации тренда ( $R_{\text{тр}}^2$ ) в дисперсию исходного процесса. Известно, что для коротких рядов величина тренда сильно зависит от их длины и при изменении длины всего лишь на одно значение она может сильно меняться и даже изменять знак. К счастью,  $R_{\text{тр}}^2$  за последние десятилетия больше 0,90, т.е. на случайные колебания приходится малая дисперсия.

Как видно из уравнений (1) и (2), уровнеобразующие факторы формируют внутригодовые изменения УМО, в межгодовом ходе которого тренда нет и в помине. Казалось бы — тупик. Однако в работе (Малинин, 2010) было показано, что формирование тренда в годовых значениях уровня УМО можно рассматривать в виде статистической модели по типу «случайного блуждания». Суть её состоит в последовательном суммировании внутригодовых приращений уровня, представляющего собой стационарный случайный процесс, развивающийся в виде модели «красный шум». Тренд этого нового ряда полностью идентичен тренду среднегодовых значений УМО, т.е.  $Tr(\Sigma \Delta h_{\text{МО}}) = Tr(h_{\text{МО}})$ . Физический смысл данного результата состоит в том, что при оценке вклада разных факторов в формирование тренда УМО представляется возможным использовать уравнения пресноводного баланса океана и изменений баланса вод в гидросфере.

Обратимся теперь к обобщающим результатам многочисленных исследований по оценке вкладов различных факторов в тренд УМО для эпохи спутниковых наблюдений (табл. 1). В первых двух столбцах таблицы приводятся результаты, заимствованные из отчётов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) (AR4 Climate..., 2007; AR5 Climate..., 2013). В третьем и четвёртом столбцах даются новые оценки вкладов уровнеобразующих факторов, причём звёздочкой отмечен период 2002–2017 гг. Это связано с запуском в 2002 г. спутника последнего поколения GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), который может измерять массу воды в океане, в ледниках и на суше. В результате УМО определяется внешне по очень простой формуле (Leuliette, Nerem, 2016):

$$\Delta h_{\text{альт}} = \Delta h_{\text{стер}} + \Delta h_{\text{масс}}. \quad (3)$$

Здесь  $h_{\text{стер}}$  рассчитывается по данным буёв АРГО (ARGO) до глубины 1500–2000 м, а параметр  $h_{\text{масс}}$ , называемый баристатическим уровнем, вычисляется с помощью данных спутников GRACE. Спутники GRACE проводят измерения аномалий гравитационного поля Земли начиная с марта 2002 г. Два спутника GRACE находятся на расстоянии примерно 220 км друг от друга, причём при пролёте над гравитационными аномалиями это расстояние изменяется,

поскольку спутники сильнее или слабее притягиваются Землёй. На спутниках установлены микроволновые дальномёры с точностью измерений вплоть до 1 мкм. Именно высокая точность измерения расстояния между спутниками позволяет улавливать самые незначительные изменения в силе притяжения. Регистрируя малейшие отклонения от ожидаемой орбиты и скорости движения спутников, можно отдельно определять изменения массы ледников Антарктиды ( $\Delta S_{\text{Ант}}$ ), Гренландии ( $\Delta S_{\text{Гренл}}$ ), горных ледников ( $\Delta S_{\text{гор.ледн}}$ ), Мирового океана ( $\Delta S_{\text{МО}}$ ) и влагозапасов суши ( $\Delta S_{\text{суш}}$ ):

$$\Delta h_{\text{масс}} = \Delta S_{\text{Ант}} + \Delta S_{\text{Гренл}} + \Delta S_{\text{гор.ледн}} + \Delta S_{\text{МО}} + \Delta S_{\text{суш}}$$

Таблица 1. Вклады различных факторов в формирование тренда уровня Мирового океана по данным отчётов МГЭИК и работ зарубежных исследователей

Факторы, влияющие на УМО	Оценки тренда, мм/год			
	1993–2003 гг. (AR4 Climate..., 2007)	1993–2010 гг. (AR5 Climate..., 2013)	1993–2017 гг. (Nerem et al., 2018)	Март 2002 г. – июнь 2017 г. (Frederikse et al., 2019)
	1	2	3	4
Термическое расширение	1,6±0,5	1,1	1,65	–
Ледники и ледниковые шапки	0,77±0,22	0,76	0,51*	0,66
Гренландский ледниковый щит	0,21±0,07	0,33	0,66*	0,80
Антарктический ледниковый щит	0,21±0,35	0,27	0,19*	0,40
Влагозапасы суши	–	0,38	–	–0,28
Сумма	2,8±0,7	2,8	3,01	1,58
Наблюдённый уровень	3,1±0,7	3,2	3,1	3,1

\* — период 2002–2017 гг.

Конечно, каждому из приведённых выше компонентов водного баланса свойственны различные неопределённости, набор которых весьма значителен (Adhikari et. al., 2019; Kundu, 2016; Pritchard et al., 2010; WCRP, 2018 и др.). Однако при их суммировании ошибки, видимо, в значительной степени компенсируются, и баристатический уровень после его сложения со стерическим уровнем даёт хорошее соответствие с альтиметрическим уровнем МО (Frederikse et al., 2019; Leuliette, Nerem, 2016; Nerem et al., 2018; Peralta-Ferriz et al., 2017; Rietbroek et al., 2016).

Естественным продолжением проекта GRACE является GRACE-FO (Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On), который представляет собой совместный проект между NASA и Немецким исследовательским центром геонаук (German Research Centre for Geosciences). Спутники GRACE-FO были выведены на орбиту 22 мая 2018 г. с целью дальнейшего мониторинга изменений массы воды в океане, ледниках и на суше. Очевидно, уже в ближайшие годы следует ждать первые результаты, полученные с помощью GRACE-FO.

Как известно, оценка стерических колебаний является очень сложным делом вследствие заведомо неоднородного пространственного распределения буев ARGO, которое к тому же постоянно меняется во времени, причём год от года их число может изменяться до 50 %. Из-за возникающих неопределённостей, подробное описание которых даётся в работе (MacIntosh et al., 2018), погрешность оценки трендов в стерических колебаниях уровня становится сравнимой с самой величиной тренда. Как видно из *табл. 1*, именно стерическая компонента, которая обусловлена теплосодержанием океана, даёт максимальный вклад (до 50 %) в тренд УМО, но при этом её погрешность по абсолютной величине (1 мм/год) больше вклада любого другого уровнеобразующего фактора.

Из *табл. 1* также следует, что отмечаются значительные расхождения в оценках вклада ледовых компонент. Удивительно, что использование спутника GRACE для одного и того же

периода наблюдений, но разными авторами (Frederikse et al., 2019; Nerem et al., 2018) приводит к расхождению оценок вклада Антарктиды в два раза! Кроме того, непонятна роль суммарных влагозапасов на суше. По одним данным они возрастают, по другим — уменьшаются. К сожалению, их изменчивость, особенно подземных вод, практически невозможно проконтролировать.

Обратимся теперь к *табл. 2*, в которой приводятся оценки вклада различных факторов в формирование тренда УМО за различные периоды времени на основе уравнения (2). Оценка стерических колебаний за 1993–2017 гг. заимствована из работы (Nerem et al., 2018). Способы оценки других трендов приводятся в работе (Малинин, 2012). Периоды 1993–2003 и 1993–2017 гг. взяты с целью сравнения с оценками зарубежных исследователей. Из сопоставления *табл. 1* и *2* следует, что в целом за период 1993–2017 гг. роль трендов суммарного стока с Гренландии и твёрдого стока с Антарктиды в трендах баланса массы этих ледниковых щитов является определяющей.

*Таблица 2.* Оценки вклада трендов различных факторов в формирование тренда УМО с использованием уравнения пресноводного баланса Мирового океана за различные промежутки времени, мм/год

Источник роста УМО	1980–2005 гг. (Малинин, 2012)	1993–2003 гг. (Малинин, 2012)	1993–2017 гг. (данная работа)
Стерические колебания	0,30	1,60	1,65
Суммарный сток с Гренландии	0,14	0,22	0,50
Твёрдый сток с Антарктиды	0,24	0,44	0,23
Приток материковых вод	0,16	0,19	0,12
Вертикальный влагообмен (осадки минус испарение)	0,62	0,43	0,66
Суммарный вклад факторов	1,56	2,88	3,16
Рост УМО по данным наблюдений	1,79	3,10	3,10
Дисбаланс (невязка)	0,23	0,22	0,08

Оценим теперь роль горных ледников. На наш взгляд, зарубежные исследователи допускают принципиальную ошибку, рассматривая таяние горных ледников в качестве вклада в изменения УМО. Таяние горных ледников, которое действительно весьма существенно, может давать непосредственный вклад в изменения УМО только с ледников, расположенных на островах в Северном Ледовитом океане, и, возможно, частично с территории Аляски, поэтому вряд ли превышает 0,1 мм/год. Горные ледники, находящиеся в Европе, Азии, Африке и Южной Америке, могут влиять на УМО, очевидно, только через приток речных вод к океану. Кроме того, значительная часть таяния ледников находится в области внутреннего стока, т. е. вообще не может попасть в океан. Поэтому отнесение их вклада в тренд УМО представляется более чем сомнительным.

Данная ситуация представляется нам следующим образом. Уже в течение нескольких десятилетий происходит уменьшение поступления водяного пара с океана на материки вследствие того, что положительный тренд в осадках над МО превышает тренд в испарении. Как было показано в работах (Малинин и др., 2018; Malinin, Gordeeva, 2017), линейный тренд в осадках ( $Tr = 0,488$  см/год) заметно выше тренда в испарении ( $Tr = 0,420$  см/год). В результате получаем, что тренд в эффективном испарении ( $E-P$ ) составляет  $Tr = -0,068$  см/год.

Итак, несмотря на тенденцию уменьшения поступления водяного пара с океана на материки, благодаря интенсивному таянию горных ледников суммарные влагозапасы на суше, в том числе подземные воды, восполняются и пока что не испытывают дефицита. Свидетельством этого служит некоторое увеличение материкового стока в океан ( $Tr = 0,12$  мм/год). Из *табл. 2* видно почти полное сходство вычисленных и фактических значений УМО, особенно за период 1993–2017 гг. Существенно хуже точность при использовании уравнения баланса вод

криосферы и суши (1). Если же исключить в *табл. 1* тренд таяния ледников из числа уровнеобразующих факторов, то появление значительной невязки (дисбаланса) между рассчитанными и фактическими значениями тренда в УМО становится очевидным.

## Проекция уровня Мирового океана на перспективу

Хорошо известно, что чем больше заблаговременность прогноза, тем ниже его оправдываемость. Особенно сложно прогнозировать на длительную перспективу. Возможно, поэтому в зарубежных исследованиях вместо слова «прогноз» часто используется термин «проекция». Хотя наибольшее внимание уделяется проекциям УМО на конец столетия, однако, на наш взгляд, прогнозы УМО на более короткие сроки (несколько десятилетий) также важны с практической точки зрения. Несомненно, что изменения глобальной температуры воздуха (ГТВ) являются важнейшим определяющим фактором колебаний УМО, однако её влияние сильно «размазано» во времени. Так, нагревание (охлаждение) океана сверху и перераспределение тепла по всей его толще достигает нижней границы главного термоклина вследствие малых вертикальных скоростей в течение нескольких десятилетий. В таянии ледниковых покровов Гренландии и Антарктиды отмечается значительное запаздывание на изменения ГТВ, которое может составлять многие десятки и даже сотни лет.

Из-за недостаточности наших знаний об изменчивости природных процессов построение детерминированных прогнозов характеристик климата на длительную перспективу представляется крайне сложным делом. Обычно для этого используются климатические сценарии МГЭИК, на основе которых рассчитываются оценки изменений глобального климата до 2100 г. с помощью комплекса (ансамбля) моделей общей циркуляции атмосферы и океана. Наиболее широкое распространение они получили в рамках проектов СМIP3 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 3) и СМIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5), результаты которых использовались соответственно в Четвёртом (AR4 Climate..., 2007) и Пятом (AR5 Climate..., 2013) оценочных докладах МГЭИК. При этом прогностические результаты, рассчитанные по отдельным моделям, характеризуются значительными расхождениями. В результате неопределённость оценок такого подхода очень велика. Так, даже для глобальной температуры воздуха она составляет 4,5 °С на 2100 г. Для уменьшения неопределённости отдельных моделей обычно выполняется усреднение по всему комплексу моделей или выбирается «лучший» сценарий и «лучшая» модель. По сути, это означает экспертный подход.

В зарубежных исследованиях для прогноза УМО на конец столетия также довольно широко применяется комплексный подход, суть которого сводится к тому, что раздельно осуществляется прогноз уровнеобразующих факторов. Прогноз стерической компоненты проводится обычно по климатическим моделям. Для оценки изменений баланса массы ледников используются региональные модели или полуэмпирические связи с определяющими параметрами. Далее полученные оценки суммируются, и в результате на выходе мы имеем прогноз УМО. Именно подобным образом на основе разных работ составлен базовый прогноз УМО в Пятом оценочном докладе экспертов МГЭИК (AR5 Climate..., 2013) на конец столетия (*табл. 3*). Нетрудно видеть, что разброс оценок УМО отмечается в диапазоне 26–82 см. Понятно, что выбор отсюда любой оценки УМО осуществляется экспертным путём.

Другой вариант более простого экспертного прогноза состоит в использовании статистических методов. Сравнение альтиметрических годовых величин УМО за период 1993–2017 гг. с данными аномалий глобальной приповерхностной температуры воздуха ( $\Delta$ ГТВ), взятых из архива HadCRUT4, показало наличие между ними хорошо выраженной линейной связи, которая аппроксимируется уравнением регрессии вида:

$$\Delta h_{\text{МО}} (\text{мм}) = 127,0 \Delta \text{ГТВ} - 50,55. \quad (4)$$

Коэффициент детерминации данной связи  $R^2 = 0,80$ , а стандартная ошибка оценки УМО  $\sigma_{y(x)} = 12,7$  мм. В предположении стационарности (неизменности) данной связи до конца столетия нетрудно рассчитать прогностические оценки УМО для четырёх климатических



сценариев CMIP5 (AR5 Climate..., 2013), которые приводятся в *табл. 3*. Дополнительно в той же таблице представлены оценки УМО, полученные по связи береговых данных с ГТВ за более длительный период (1960–2005) (Малинин, 2012). Поскольку прогностические оценки УМО по спутниковым и береговым данным за разные промежутки времени почти совпадают, то это подтверждает неизменность связи УМО с ГТВ с 1960 г. Оценки УМО, полученные статистическим методом, несколько ниже по сравнению с оценками МГЭИК. Очевидно, это нижние пределы роста УМО. Такие прогнозы можно считать оптимистическими. Однако в связи с возможным ускорением темпов глобального потепления очень вероятно ускорение роста УМО.

*Таблица 3.* Прогностические оценки уровня Мирового океана на 2081–2100 гг. для сценариев CMIP5 на основе моделей климата (AR5 Climate..., 2013) по спутниковым данным за 1993–2018 гг. и береговым данным за 1960–2005 гг., в метрах

Сценарии CMIP5	Прогноз ГТВ экспертами МГЭИК, °C (AR5 Climate..., 2013, с. 1031)	Прогноз УМО экспертами МГЭИК (AR5 Climate..., 2013, с. 1180)	Статистический прогноз УМО по спутниковым данным за 1993–2018 гг. (данная работа)	Статистический прогноз УМО по береговым данным за 1960–2005 гг. (Малинин, 2012)
RCP2.6	0,3–1,7	0,26–0,55	0,12–0,17	0,03–0,18
RCP4.5	1,1–2,6	0,32–0,63	0,09–0,28	0,12–0,28
RCP6.0	1,4–3,1	0,33–0,63	0,13–0,34	0,15–0,33
RCP8.5	2,6–4,8	0,45–0,82	0,28–0,56	0,28–0,51

По мнению многих исследователей, даже высшая оценка УМО по сценарию RCP8.5 с очень высокой вероятностью окажется заниженной к концу XXI в. Причиной этого называется резкое усиление таяния ледникового щита Гренландии, частичное разрушение Западно-Антарктического щита Антарктиды и рост теплосодержания океана (AR5 Climate..., 2013; Curry, 2018; Leuliette, Nerem, 2016; Nerem et al., 2018; WCRP, 2018). Конечно, в условиях очень высокой неопределённости экспертных прогностических оценок указанных факторов давать конкретные прогнозы УМО вряд ли возможно. Поэтому дополнительно к сценариям CMIP5 стали вводиться различные сценарные подходы, ориентированные уже на конкретные оценки роста уровня океана. Например, в работе (Parris et al., 2012) были предложены четыре отметки УМО: низкий (0,2 м), промежуточный низкий (0,5 м), промежуточный высокий (1,2 м), высокий (2 м), — которые могут быть реализованы с различной вероятностью. В работе (Hall et al., 2016) набор расширен до пяти сценариев (0,2; 0,5; 1,0; 1,5 и 2 м). Однако растущее количество свидетельств ускоренной потери льда в Антарктике и Гренландии усилило аргументы в пользу рассмотрения наихудших сценариев в росте УМО. Аргументы в поддержку экстремального сценария роста УМО в диапазоне от 2,0 до 2,7 м приводятся в работах (Kopp et al., 2014; Miller et al., 2013).

*Таблица 4.* Высота сценария подъёма УМО для средних 19-летних значений по данным работы (Sweet et al., 2017), в метрах

Сценарии УМО	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Низкий	0,03	0,06	0,09	0,13	0,16	0,19	0,22	0,25	0,28	0,30
Промежуточный низкий	0,04	0,08	0,13	0,18	0,24	0,29	0,35	0,40	0,45	0,50
Промежуточный	0,04	0,10	0,16	0,25	0,34	0,45	0,57	0,71	0,85	1,0
Промежуточный высокий	0,05	0,10	0,19	0,30	0,44	0,60	0,79	1,0	1,2	1,5
Высокий	0,05	0,11	0,21	0,36	0,54	0,77	1,0	1,3	1,7	2,0
Экстремальный	0,04	0,11	0,24	0,41	0,63	0,90	1,2	1,6	2,0	2,5

В последнем докладе NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, Национальное управление океанических и атмосферных исследований) (Sweet et al., 2017) в результате тщательного анализа прогнозных характеристик уровнеобразующих факторов рекомендовано чуть уменьшить экстремальный сценарий подъёма УМО до 2,5 м. Для шести сценариев в работе (Sweet et al., 2017) представлены прогностические оценки УМО до 2100 г. (табл. 4). По низкому сценарию рост УМО соответствует линейному тренду, по самому экстремальному (крайне пессимистическому) сценарию УМО растёт экспоненциально. Оценка УМО, равная 2,5 м в 2100 г., достигается при тренде 44 мм/год за 2080–2100 гг. При этом вероятность достижения отметки 2,5 м по сценарию RCP8.5 составляет 0,1 %, по сценарию RCP4.5 — 0,05 % (Kopp et al., 2017). Разумеется, вероятность роста УМО на 2,5 м крайне мала, но учитывать её при обустройстве прибрежной зоны, вероятно, необходимо.

Итак, мы видим огромный разброс в проекциях УМО на конец столетия. Есть ли смысл в подобных прогнозах? Очевидно, можно согласиться с авторами работы (Kopp et al., 2017), в которой сделан вывод, что *«диапазон опубликованных прогнозов, а также оставшиеся структурные неопределённости лишь подчёркивают тот факт, что будущее повышение уровня моря остаётся ареной глубокой неопределённости»*.

## Заключение

Современному уровню Мирового океана свойственна очень малая изменчивость. Подавляющую долю дисперсии межгодовых изменений уровня описывает линейный тренд ( $R^2 = 0,94$ ), что значительно облегчает изучение его генезиса. В зарубежных исследованиях для этой цели используется уравнение баланса вод в гидросфере, согласно которому изменения УМО определяются соответствующими изменениями массы воды различных компонентов криосферы и запасов поверхностных и подземных вод суши. При этом допускается принципиальная ошибка, поскольку таяние горных ледников рассматривается в качестве вклада в изменения УМО. Несмотря на значительные успехи в использовании спутников GRACE для оценки баристатического уровня, расхождения в оценках его отдельных компонентов ещё велики. Вследствие заведомо неоднородного пространственного распределения глубоководных данных по температуре воды погрешность оценки трендов в стерических колебаниях уровня становится сравнимой с самой величиной тренда.

Другой подход, развиваемый в РГГМУ, состоит в том, что оценка вкладов различных факторов осуществляется с использованием уравнения пресноводного баланса Мирового океана как сумма эвстатических и стерического факторов. На наш взгляд, определение компонентов водного баланса МО несколько проще, чем изменения массы ледников криосферы и влагозапасов поверхностных и особенно подземных вод на суше. Показано, что в течение нескольких десятилетий происходит уменьшение поступления водяного пара с океана на материки вследствие того, что положительный тренд в осадках над МО превышает тренд в испарении. Уменьшение переноса влаги на материки идёт со скоростью примерно 0,6 мм/год. Однако, несмотря на данную тенденцию, благодаря интенсивному таянию горных ледников суммарные влагозапасы на суше, в том числе подземные воды, восполняются и пока что не испытывают дефицита.

Оценка проекций УМО на перспективу является крайне важной с точки зрения обустройства инфраструктуры прибрежной зоны, в которой проживает до 1 млрд человек. Для прогноза УМО на конец столетия обычно используются климатические сценарии. В Пятом оценочном докладе МГЭИК предложены четыре сценария, отличающиеся друг от друга величиной эмиссии углекислого газа. По самому жёсткому сценарию RCP8.5, согласно проекту СМIP5 УМО, может возрасти на 0,45–0,82 м. Близкие оценки были получены и в работах РГГМУ. Такие прогнозы можно считать оптимистическими. Однако, по мнению многих исследователей, даже высшая оценка УМО по сценарию RCP8.5 с очень высокой вероятностью окажется заниженной к концу столетия. Причиной этого называется резкое усиление таяния ледникового щита Гренландии, частичное разрушение Западно-Антарктического щита Антарктиды и рост теплосодержания океана. Согласно самому экстремальному сценарию

УМО растёт экспоненциально. Оценка УМО, равная 2,5 м в 2100 г., достигается при тренде 44 мм/год за 2080–2100 гг. При этом вероятность достижения отметки 2,5 м по сценарию RCP8.5 составляет 0,1 %, по сценарию RCP4.5 — 0,05 %. Впрочем, возникающие при этом неопределённости столь велики, что осуществление такого прогноза УМО выглядит в настоящее время в значительной степени утопическим.

## Литература

1. *Лебедев С. А.* Межгодовая изменчивость температуры поверхности и уровня Южного океана по данным дистанционного зондирования // Ученые записки РГГМУ. 2008. № 6. С. 82–88.
2. *Малинин В. Н.* К анализу тренда в уровне Мирового океана // Изв. Русского географ. об-ва. 2010. Т. 142. № 5. С. 1–9.
3. *Малинин В. Н.* Уровень океана: настоящее и будущее. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2012. 260 с.
4. *Малинин В. Н.* Изменения уровня Мирового океана и климата // Ученые записки РГГМУ. 2015. № 41. С. 100–115.
5. *Малинин В. Н., Шевчук О. И.* Эвстатические колебания уровня Мирового океана в современных климатических условиях // Изв. Русского географ. об-ва. 2008. Т. 140. Вып. 4. С. 20–30.
6. *Малинин В. Н., Глок Н. И.* Использование спутниковых данных о температуре поверхностного слоя воды для оценки стерических колебаний уровня Мирового океана // Исследование Земли из космоса. 2014. № 3. С. 27–32.
7. *Малинин В. Н., Гордеева С. М., Шевчук О. И.* Изменчивость уровня Мирового океана за последние 140 лет // Ученые записки РГГМУ. 2007. № 4. С. 125–132.
8. *Малинин В. Н., Гордеева С. М., Наумов Л. М.* Влагосодержание атмосферы как климатообразующий фактор // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 243–251.
9. *Малинина Ю. В.* К оценке возможного ущерба от возможного повышения уровня океана в XXI столетии // Ученые записки РГГМУ. 2010. № 14. С. 162–176.
10. *Ablain M., Legeais J. F., Prandi P., Marcos M., Fenoglio-Marc L., Dieng H. B., Benveniste J., Cazenave A.* Satellite Altimetry-Based Sea Level at Global and Regional Scales // Surveys in Geophysics. 2017. V. 38. Iss. 1. P. 7–31. DOI: 10.1007/s10712-016-9389-8.
11. *Adhikari S., Ivins E. R., Frederikse T., Landerer F.W., Caron L.* Sea-level fingerprints emergent from GRACE mission data // Earth System Science Data Discussions. 2019. In review. DOI: 10.5194/essd-2019-3.
12. AR4 Climate Change 2007: The Physical Science Basis. IPCC Report. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, H. L. Miller. Cambridge, N.Y.: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
13. AR5 Climate Change 2013: The Physical Science Basis. IPCC Report. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley. Cambridge, N.Y.: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
14. *Church J. A., White N. J.* A 20<sup>th</sup> century acceleration in global sea-level rise // Geophysical Research Letters. 2006. V. 33. No. 1. L01602.
15. *Curry J.* Sea Level and Climate Change: Special Report. Climate Forecast Applications Network, 2018. 79 p. URL: <https://curryja.files.wordpress.com/2018/11/special-report-sea-level-rise3.pdf>.
16. *Dangendorf S., Marcos M., Woppelman G., Conrad C. P., Frederikse T., Riva R.* Reassessment of 20<sup>th</sup> century global sea level rise // Proc. National Academy of Sciences. 2017. V. 114. No. 23. P. 5946–5951.
17. *Frederikse T., Landerer F.W., Caron L.* The imprints of contemporary mass redistribution on regional sea level and vertical land motion observations // Solid Earth Discussions. 2019. In review. DOI: 10.5194/se-2018-128.
18. *Hall J. A., Gill S., Obeysekerera J., Sweet W., Knuuti K., Marburger J.* Regional Sea Level Scenarios for Coastal Risk Management: Managing the Uncertainty of Future Sea Level Change and Extreme Water Levels for Department of Defense Coastal Sites Worldwide. U.S. Department of Defense, Strategic Environmental Research and Development Program. 2016. 224 p.
19. *Jevrejeva S., Grinsted A., Moore J. C., Holgate S.* Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records // J. Geophysical Research. 2006. V. 111. No. C9. DOI: 10.1029/2005JC003229.
20. *Kopp R. E., Horton R. M., Little C. M., Mitrovica J. X., Oppenheimer M., Rasmussen D. J., Strauss B., Tebaldi C.* Probabilistic 21<sup>st</sup> and 22<sup>nd</sup> century sea level projections at a global network of tide gauge sites // Earth's Future. 2014. V. 2. No. 8. P. 383–406.

21. *Kopp R. E., DeConto R. M., Bader D. A., Hay C. C., Horton R. M., Kulp S., Oppenheimer M., Pollard D., Strauss B. H.* Evolving Understanding of Antarctic Ice-Sheet Physics and Ambiguity in Probabilistic Sea-Level Projections // *Earth's Future*. 2017. V. 5. No. 12. P. 1217–1233. DOI: 10.1002/2017EF000663.
22. *Kundu S. N.* GRACE, Climate Change and Future Needs: A Brief Review // *J. Climatology and Weather Forecasting*. 2016. V. 4. No. 3. 1000179. DOI: 10.4172/2332-2594.1000179.
23. *Leuliette E. W., Nerem R. S.* Contributions of Greenland and Antarctica to Global and Regional Sea Level Change // *Oceanography*. 2016. V. 29. No. 4. P. 154–159. DOI: 10.5670/oceanog.2016.107.
24. *MacIntosh C. R., Merchant C. J., von Schuckmann K.* Uncertainties in Steric Sea Level Change Estimation During the Satellite Altimeter Era: Concepts and Practices // *Surveys in Geophysics*. 2018. No. 38. P. 59–87. DOI: 10.1007/s10712-016-9387-x.
25. *Malinin V. N.* Variations of global water exchange under changing climate // *Water Resources*. 2009. V. 36. No. 1. P. 12–125. URL: <https://doi.org/10.1134/S0097807809010023>.
26. *Malinin V. N., Gordeeva S. M.* Variability of Evaporation and Precipitation over the Ocean from Satellite Data // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017. V. 53. No. 9. P. 934–944.
27. *Miller K. G., Kopp R. E., Horton B. P., Browning J. V., Kemp A. C.* A geological perspective on sea-level rise and impacts along the U.S. mid-Atlantic coast // *Earth's Future*. 2013. No. 1. P. 3–18. DOI: 10.1002/2013EF000135.
28. *Nerem R. S., Beckley B. D., Fasullo J. T., Hamlington B. D., Masters D., Mitchum G. T.* Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era // *Proc. National Academy of Sciences*. 2018. V. 115. No. 9. P. 2022–2025. DOI: 10.1073/pnas.1717312115.
29. *Parris A., Bromirski P., Burkett V., Cayan D. R., Culver M. E., Hall J., Horton R. M., Knuuti K., Moss R. H., Obeysekera J., Sallenger A. H., Weiss J.* Global Sea Level Rise Scenarios for the US National Climate Assessment: NOAA Tech Memo OAR CPO-1. 2012. 37 p.
30. *Peralta-Ferriz C., Landerer F. W., Chambers D. P., Volkov D., Liovel W.* Remote sensing of bottom pressure from GRACE satellites // *US CLIVAR Variations Newsletter Edition*. 2017. V. 15. No. 2. P. 22–29.
31. *Pritchard H. D., Luthcke S. B., Fleming A. H.* Understanding ice-sheet mass balance: progress in satellite // *J. Glaciology*. 2010. V. 56. No. 200. P. 1151–1161.
32. *Rietbroek R., Brunnabenda S.-E., Kuschea J., Schröter J., Dahlec C.* Revisiting the contemporary sea-level budget on global and regional scales // *Proc. National Academy of Sciences*. 2016. V. 113. No. 6. P. 1504–1509. DOI: 10.1073/pnas.1519132113.
33. *Sweet W., Kopp R. E., Weaver C. P., Obeysekera J., Horton R. M., Thieler E. R., Zervas C.* Global and regional sea level rise scenarios for the United States: NOAA Technical Report NOS CO-OPS 083. Maryland: Silver Spring, 2017. 75 p.
34. *WCRP Global Sea Level Budget Group.* Global sea-level budget 1993–present // *Earth System Science Data*. 2018. V. 10. No. 3. P. 1551–1590.

## Changes in the global sea level in the current century

V. N. Malinin, S. M. Gordeeva, O. I. Shevchuk

*Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg 192007, Russia  
E-mail: malinin@rshu.ru*

The article is devoted to the state of knowledge of the global sea level (GSL) changes in the past and nowadays, to the genesis of its interannual fluctuations, as well as its long-term (a century) projections. Two approaches to the genesis of the GSL are discussed. Foreign studies use the water balance equation in the hydrosphere whereby the GSL changes are determined by the corresponding variation in the volume of water of different cryospheric components and reserves of surface and underground continental waters. Another approach estimates the contribution of various factors using fresh-water balance equation as a sum of eustatic and steric factors. We consider the GSL projections at the end of the century based on the climatic scenarios of CMIP5. In view of the possible significant climate warming we discuss the probabilities of extreme scenarios of the GSL rise by 2.5 m.

**Keywords:** total precipitable water, air temperature, greenhouse effect, global warming, statistical models

Accepted: 15.08.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-9-22

## References

1. Lebedev S. A., Mezhsodovaya izmenchivost' temperatury poverkhnosti i urovnya Yuzhnogo okeana po dannym distantsionnogo zondirovaniya (Interannual Variability in the Southern Ocean Surface Temperature Based on Remote Sensing Data), *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2008, No. 6, pp. 82–88.
2. Malinin V. N., K analizu trenda v urovne Mirovogo okeana (To the analysis of the trend of World Ocean level fluctuations), *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*, 2010, Vol. 142, No. 5, pp. 1–9.
3. Malinin V. N., *Uroven' okeana: nastoyashchee i budushchee* (The ocean level: present and future), Saint Petersburg: Izd. RGGMU, 2012, 260 p.
4. Malinin V. N., Izmeneniya urovnya Mirovogo okeana i klimata (Global sea level and climate variation), *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2015, No. 41, pp. 100–115.
5. Malinin V. N., Shevchuk O. I., Evstatische kolebaniya urovnya Mirovogo okeana v sovremennykh klimaticheskikh usloviyakh (Eustatic changes of the World Ocean level in contemporary climatic conditions), *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*, 2008, Vol. 140, No. 4, pp. 20–30.
6. Malinin V. N., Glok N. I., Ispol'zovanie sputnikovykh dannykh o temperature poverkhnostnogo sloya vody dlya otsenki stericheskikh kolebaniy urovnya Mirovogo okeana (Using Satellite Data on Sea Surface Temperature to Estimate Steric Fluctuations of Global Sea Level), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 3, pp. 27–32.
7. Malinin V. N., Gordeeva S. M., Shevchuk O. I., Izmenchivost' urovnya Mirovogo okeana za poslednie 140 let (Variability of the global sea level for the past 140 years), *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2007, No. 4, pp. 125–132.
8. Malinin V. N., Gordeeva S. M., Naumov L. M., Vlagosoderzhanie atmosfery kak klimatoobrazuyushchii faktor (Total precipitable water of the atmosphere as a climate forcing factor), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 3, pp. 243–251.
9. Malinina Yu. V., K otsenke vozmozhnogo ushcherba ot vozmozhnogo povysheniya urovnya okeana v XXI stoletii (On estimation of possible losses caused by potential sea level rise during the 21st century), *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2010, No. 14, pp. 162–176.
10. Ablain M., Legeais J. F., Prandi P., Marcos M., Fenoglio-Marc L., Dieng H. B., Benveniste J., Cazenave A., Satellite Altimetry-Based Sea Level at Global and Regional Scales, *Surveys in Geophysics*, 2017, Vol. 38, No. 1, pp. 7–31, DOI: 10.1007/s10712-016-9389-8.
11. Adhikari S., Ivins E. R., Frederikse T., Landerer F. W., Caron L., Sea-level fingerprints emergent from GRACE mission data, *Earth System Science Data Discussions*, 2019, in review, DOI: 10.5194/essd-2019-3.
12. *AR4 Climate Change 2007: The Physical Science Basis, IPCC Report, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, H. L. Miller (eds.), Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2007, 996 p.
13. *AR5 Climate Change 2013: The Physical Science Basis, IPCC Report, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley (eds.), Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2013, 1535 p.
14. Church J. A., White N. J., A 20<sup>th</sup> century acceleration in global sea-level rise, *Geophysical Research Letters*, 2006, Vol. 33, No. 1, p. L01602.
15. Curry J., *Sea Level and Climate Change: Special Report*, Climate Forecast Applications Network, 2018, 79 p.
16. Dangendorf S., Marcos M., Woppelmann G., Conrad C. P., Frederikse T., Riva R., Reassessment of 20<sup>th</sup> century global sea level rise, *Proc. National Academy of Sciences*, 2017, Vol. 114, No. 23, pp. 5946–5951.
17. Frederikse T., Landerer F. W., Caron L., The imprints of contemporary mass redistribution on regional sea level and vertical land motion observations, *Solid Earth Discussions*, 2019, in review, DOI: 10.5194/se-2018-128.
18. Hall J. A., Gill S., Obeysekera J., Sweet W., Knuuti K., Marburger J., *Regional Sea Level Scenarios for Coastal Risk Management: Managing the Uncertainty of Future Sea Level Change and Extreme Water Levels for Department of Defense Coastal Sites Worldwide*, U. S. Department of Defense, Strategic Environmental Research and Development Program, 2016, 224 p.
19. Jevrejeva S., Grinsted A., Moore J. C., Holgate S., Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records, *J. Geophysical Research*, 2006, Vol. 111, No. C9, DOI: 10.1029/2005JC003229.
20. Kopp R. E., Horton R. M., Little C. M., Mitrovica J. X., Oppenheimer M., Rasmussen D. J., Strauss B., Tebaldi C., Probabilistic 21<sup>st</sup> and 22<sup>nd</sup> century sea level projections at a global network of tide gauge sites, *Earth's Future*, 2014, Vol. 2, No. 8, pp. 383–406.

21. Kopp R. E., DeConto R. M., Bader D. A., Hay C. C., Horton R. M., Kulp S., Oppenheimer M., Pollard D., Strauss B. H., Evolving Understanding of Antarctic Ice-Sheet Physics and Ambiguity in Probabilistic Sea-Level Projections, *Earth's Future*, 2017, Vol. 5, No. 12, pp. 1217–1233, DOI: 10.1002/2017EF000663.
22. Kundu S. N., GRACE, Climate Change and Future Needs: A Brief Review, *J. Climatology and Weather Forecasting*, 2016, Vol. 4, No. 3, 1000179, DOI: 10.4172/2332-2594.1000179.
23. Leuliette E. W., Nerem R. S., Contributions of Greenland and Antarctica to Global and Regional Sea Level Change, *Oceanography*, 2016, Vol. 29, No. 4, pp. 154–159, DOI: 10.5670/oceanog.2016.107.
24. MacIntosh C. R., Merchant C. J., von Schuckmann K., Uncertainties in Steric Sea Level Change Estimation During the Satellite Altimeter Era: Concepts and Practices, *Surveys in Geophysics*, 2018, No. 38, pp. 59–87, DOI: 10.1007/s10712-016-9387-x.
25. Malinin V. N., Variations of global water exchange under changing climate, *Water Resources*, 2009, Vol. 36, No. 1, pp. 12–125, DOI: 10.1134/S0097807809010023.
26. Malinin V. N., Gordeeva S. M., Variability of Evaporation and Precipitation over the Ocean from Satellite Data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2017, Vol. 53, No. 9, pp. 934–944.
27. Miller K. G., Kopp R. E., Horton B. P., Browning J. V., Kemp A. C., A geological perspective on sea-level rise and impacts along the U.S. mid-Atlantic coast, *Earth's Future*, 2013, No. 1, pp. 3–18, DOI: 10.1002/2013EF000135.
28. Nerem R. S., Beckley B. D., Fasullo J. T., Hamlington B. D., Masters D., Mitchum G. T., Climate-change–driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era, *Proc. National Academy of Sciences*, 2018, Vol. 115, No. 9, pp. 2022–2025, DOI: 10.1073/pnas.1717312115.
29. Parris A., Bromirski P., Burkett V., Cayan D. R., Culver M. E., Hall J., Horton R. M., Knutti K., Moss R. H., Obeysekera J., Sallenger A. H., Weiss, J., *Global Sea Level Rise Scenarios for the US National Climate Assessment: NOAA Tech Memo OAR CPO-1*, 2012, 37 p.
30. Peralta-Ferriz C., Landerer F. W., Chambers D. P., Volkov D., Liovel W., Remote sensing of bottom pressure from GRACE satellites, *US CLIVAR Variations Newsletter Edition*, 2017, Vol. 15, No. 2, pp. 22–28.
31. Pritchard H. D., Luthcke S. B., Fleming A. H., Understanding ice-sheet mass balance: progress in satellite, *J. Glaciology*, 2010, Vol. 56, No. 200, pp. 1151–1161.
32. Rietbroek R., Brunnabenda S.-E., Kuschea J., Schröterb J., Dahlec C., Revisiting the contemporary sea-level budget on global and regional scales, *Proc. National Academy of Sciences*, 2016, Vol. 113, No. 6, pp. 1504–1509, DOI: 10.1073/pnas.1519132113.
33. Sweet W., Kopp R. E., Weaver C. P., Obeysekera J., Horton R. M., Thieler E. R., Zervas C., *Global and regional sea level rise scenarios for the United States: NOAA Technical Report NOS CO-OPS 083*, Maryland, Silver Spring, 2017, 75 p.
34. WCRP Global Sea Level Budget Group: Global sea-level budget 1993–present, *Earth System Science Data*, 2018, Vol. 10, No. 3, pp. 1551–1590.